

Programme Canne à Sucre (CIRAD CA)

Pôle Canne à Sucre Réunion

Service Gestion de l'Eau (GE)

**Présentation et mode de fonctionnement d'OSIRI-Run,
outil de conseil en irrigation adapté à un environnement hétérogène
et à des petits agriculteurs.**

**Jean-Louis Chopart¹, Mickaël Mézino¹, Frédéric Aure²,
Lionel Le Mézo¹, Muriel Mété³**

¹ *CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement)*

² *Chambre d'Agriculture de la Réunion (France)*

³ *Office de l'eau Réunion.*

Novembre 2005

¹ **CIRAD-CA station Ligne Paradis, 7, chemin de l'IRAT, 97410, St Pierre La Réunion.
chopart@cirad**

Présentation et mode de fonctionnement d'un outil de conseil en irrigation, OSIRI-Run, adapté à un environnement hétérogène et à des petits agriculteurs.

**Jean-Louis Chopart¹, Mickaël Mézino¹, Frédéric Aure², Lionel Le Mézo¹,
et Muriel Mété³**

¹*CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement)*

²*Chambre d'Agriculture de la Réunion (France)*

³*Office de l'eau Réunion.*

Résumé

L'outil de conseil OSIRI-Run a été élaboré pour répondre à une demande locale des petits producteurs de canne à sucre à la Réunion. C'est un outil d'aide à la décision en irrigation par aspersion ou localisée, adapté à un climat et à des sols hétérogènes et pour des cultures pouvant avoir des besoins très différents d'une parcelle à l'autre. Il est fondé sur le couplage d'un modèle de bilan hydrique et d'une modélisation des règles de décision. Il affiche un conseil par secteur d'irrigation dans l'unité de programmation de l'irrigation, jusqu'à la récolte. Il peut aussi simuler différents scénarios de systèmes d'irrigation pour optimiser les performances. Une procédure facultative d'ajustement direct par l'agriculteur, ainsi qu'un rationnement contrôlé en fin de cycle sont proposés. Pour que l'outil soit fonctionnel et adapté à la demande, le nombre de variables d'entrée est faible et la fiche de conseil remise aux agriculteurs est aussi simple que possible. OSIRI-Run est le fruit d'une collaboration étroite entre un organisme de recherche appliqué et un organisme de développement agricole, en liaison directe avec les producteurs. Les premiers résultats de terrain sont positifs. L'outil a été mis au point pour la culture de la canne à sucre à la Réunion, mais il n'est spécifique ni de cette culture ni de ce milieu.

SOMMAIRE

OBJECTIFS ET METHODES	4
1 Un nouvel outil, pour quel environnement physique, agricole et humain ?.....	4
11 Environnement physique, pratiques actuelles d'irrigation	4
12 L'outil actuel de conseil en irrigation.....	5
2 Méthodes d'étude.....	5
RESULTATS : Présentation de l'outil.....	5
1 Principes généraux et concepts	6
2 Mode d'utilisation de l'outil	6
3 Contenu des différents modules d'Osiri-Run	9
31 Paramètres d'entrée pour le bilan hydrique et le calcul des doses (module 1)	9
32 Modèle de bilan hydrique (module 2)	9
33 Calcul des doses d'irrigation à apporter (module 3)	11
34 Visualisation du bilan hydrique avec les doses irrigations, (modules 4 et 5)....	15
35 Fiches de conseil (module 5).....	15
36 Actions de l'agriculteur et recalcul du bilan hydrique (modules 6,7,8)	15
37 Ajustements de l'irrigation entre deux calculs du bilan hydrique (module 9)...	16
4 procédures annexes. (date de sevrage, gestion de fichier).....	17
DISCUSSION CONCLUSION	19

INTRODUCTION

Dans beaucoup de systèmes irrigués, le principe de précaution conduit souvent à des apports excessifs, notamment tant que le prix de l'eau est faible, ce qui est actuellement le cas à la Réunion. Mais, du fait d'une forte démographie, d'une urbanisation rapide et d'une ressource limitée, l'eau agricole va y être de plus en plus en concurrence avec l'eau à usages domestique et industriel. Il faut donc optimiser la durabilité et la rentabilité de la ressource en eau agricole, notamment par le développement et l'utilisation d'outils d'aide à sa gestion qui soient adaptés aux spécificités environnementales et socio-économiques de la Réunion (faible niveau de formation et fermes de surfaces réduites).

Il existe déjà de nombreux outils de conseil ou de pilotage d'irrigation. Toutefois, beaucoup concernent l'irrigation gravitaire (Georges *et al.* 2004, Mailhol, 2005) ou par aspersion avec des matériels ne correspondant pas aux systèmes irrigués de la Réunion. Parmi les types de conseil en petite irrigation à l'échelle de la parcelle, on peut citer : (i) l'utilisation d'indicateurs d'état hydrique de la plante (Jackson, 1984) ou du sol, (ii) la modélisation du bilan hydrique (Smith, 1992 ; Inman-Bamber *et al.*, 2002), (iii) l'établissement de fiches fondées sur des valeurs moyennes de climat et de besoins en eau des cultures. Le premier type de conseil n'est pas adapté à la Réunion, à cause de la variabilité des sols et de la complexité des mesures in situ qu'il convient de mettre en œuvre.

A la Réunion, les agents du développement agricole proposent actuellement un conseil très simple, assimilable à la catégorie (iii). Il est fondé sur l'estimation des besoins en eau de la culture à partir des moyennes régionales d' ET_0 tirées d'études fréquentielles et des fluctuations moyennes des coefficients culturaux. Après une pluie, la date de reprise des irrigations est laissée à l'appréciation de l'agriculteur, ce qui peut conduire à des irrigations excédentaires. Un autre outil de type (ii), beaucoup plus sophistiqué (Combres et Kamiénarz, 1992) a été testé. Mais il s'est avéré trop complexe pour une large diffusion. Les décideurs locaux ont souhaité disposer d'un outil d'aide à la décision en irrigation qui soit intermédiaire entre ces deux extrêmes. Pour répondre à cette demande, un nouvel outil a été élaboré localement en relation avec les agriculteurs.

OBJECTIFS ET METHODES

1 Un nouvel outil, pour quel environnement physique, agricole et humain ?

11 Environnement physique, pratiques actuelles d'irrigation

La Réunion est une île en zone tropicale (latitude 21°, longitude 55°). A cause du relief accentué (point culminant à 3100 mètres) et de l'effet de foehn, la variabilité spatio-temporelle du climat y est très grande, en particulier la pluie qui varie de 0.5 à 10 mètres par an, avec des gradients très forts à l'échelle kilométrique. La température et l'évaporation potentielle sont également très dépendantes du relief (Chopart *et al.*, 2002). Les sols agricoles, argileux mais perméables, sont issus d'un volcanisme récent. Leur profondeur est très variable avec la présence d'éléments grossiers dont la teneur peut dépasser 50%.

A la Réunion, la canne à sucre est la culture principale dont presque la moitié des surfaces est irriguée, notamment dans la partie Ouest et le Sud-Ouest de l'île, la moins pluvieuse. De nouvelles surfaces irriguées sont en cours d'aménagement. Pour irriguer,

l'agriculteur dispose d'une borne délivrant en permanence un débit d'eau constant. L'eau est apportée par des asperseurs ou appliquée directement au sol par des goutteurs. L'irrigation par aspersion utilise du matériel fixe ou semi-mobile. Les dispositifs d'irrigation localisée sont fixes. Les surfaces des fermes sont pour la plupart inférieures à 5 ha avec plusieurs champs pouvant être subdivisés en unités d'irrigation, appelées secteurs. En irrigation par aspersion, l'agriculteur irrigue séquentiellement ses secteurs en se fixant une règle de récurrence allant de 2 à 10 jours. L'irrigation localisée a généralement lieu une fois par jour. L'intervalle de temps choisi entre deux irrigations possibles est appelé tour d'eau. Il correspond à la durée nécessaire pour irriguer tous les secteurs alimentés par une même borne. Les dispositifs d'irrigation sont souvent équipés d'un programmeur fixant les dates et les doses d'apport pour un ou plusieurs secteurs. L'agriculteur peut bénéficier d'un conseil par des agents du service de développement agricole dont le faible nombre constitue néanmoins un facteur limitant.

12 L'outil actuel de conseil en irrigation

Le conseil proposé actuellement, élaboré par des agents de la CA (Aure, communication pers. 2004) est appelé «conseil ETM ». Ce conseil est fondé sur l'estimation des besoins maximum en eau de la culture (MET) à partir : (i) des moyennes régionales d' Et_0 tirées d'études fréquentielles et d'interpolations locales (Chopart *et al.* 2003), (ii) des fluctuations moyennes des coefficients culturaux tirés de la littérature et de travaux locaux. La pluie et le stockage de l'eau dans le sol ne sont pas pris en compte. Le «conseil ETM » propose des doses d'irrigation par secteur d'irrigation et par période de 10 jours, indépendamment de l'année. Après une pluie, la date de la reprise des irrigations est estimée par l'agriculteur, ce qui peut conduire à des irrigations excédentaires.

Seuls quelques agriculteurs de haute technicité peuvent utiliser eux-mêmes des méthodes de pilotage d'irrigation plus sophistiquées. Actuellement, la majorité des agriculteurs ne bénéficie d'aucun conseil. Ils ne sont pas incités à économiser l'eau car le prix est encore faible et il n'y a pas de pénalisation de surconsommations. Ces conditions peuvent bien sûr changer très rapidement.

2 Méthodes d'étude

L'outil a été élaboré à l'aide de Visual-Basic®, il fonctionne dans l'environnement Windows (Microsoft®) avec le tableur Excel 2000® ou supérieur, sur les micro-ordinateurs familiaux disposant de la suite Office 2000® ou supérieur. Il occupe un espace mémoire de 4 Mo, ce qui le rend facilement diffusable et copiable. Les données sont stockées en fichiers Excel®, exportables vers les tableurs usuels. Le modèle de bilan hydrique retenu est PROBE (Chopart et Siband, 1988; Chopart et Vauclin, 1990 ; Vauclin et Chopart, 1991). Selon la classification proposée par Addiscott et Wagenet (1985), il s'agit d'un modèle fonctionnel, déterministe, de type capacitif. Il travaille à un pas de temps journalier.

RESULTATS : Présentation de l'outil

L'acronyme (OSIRI : Outil Simplifié pour une Irrigation Raisonnée et Individualisée) affiche les finalités du produit : outil simple, optimisant l'eau d'irrigation et de pluie,

tenant compte de l'hétérogénéité des paramètres d'irrigation et d'environnement. Le suffixe Run (Réunion) montre l'origine.

1 Principes généraux et concepts

OSIRI-Run est un logiciel de conseil en irrigation, opérationnel à l'échelle d'un champ ou d'une unité homogène d'irrigation. L'unité peut aller de la maille d'asperseur ou de la ligne de goutteurs jusqu'à des surfaces importantes irriguées en même temps. Le jour où l'irrigation est possible, la dose est calculée par des algorithmes faisant appel à différents paramètres : stock hydrique du jour estimé par le logiciel PROBE (Chopart et Siband, 1988), ou stock initial, pluies prévisibles, besoins en eau de la culture, débit et temps d'irrigation possibles, périodicité des apports d'eau, niveaux haut (TR) et bas (SD) de remplissage du réservoir en eau du sol (MAWs). Les pluies prévisibles sont estimées à partir d'une étude fréquentielle des pluies mesurées dans les postes météo les plus proches. Une simulation journalière du bilan hydrique PROBE est alors effectuée pour le tour d'eau à venir, avec l'irrigation programmée et des pluies journalières prévues au cours du tour d'eau. Ceci permet de disposer, à la fin du tour d'eau, d'un nouvel état des réserves, qui servira à déterminer l'irrigation pour le tour d'eau suivant. Ce processus de calcul se répète jusqu'à la récolte. L'agriculteur dispose ainsi d'une estimation des irrigations jusqu'à la fin du cycle et d'une aide pour sa stratégie d'irrigation. Les doses conseillées sont affichées dans l'unité de programmation de l'irrigation sous deux formes : (i) par secteur d'irrigation pour la durée de la culture, (ii) pour tous les secteurs par mois.

Il est souhaitable de recalculer périodiquement le bilan hydrique avec les pluies et les irrigations réelles reçues, pour recalculer l'état des réserves hydriques et donner une meilleure pertinence au conseil. Si ce travail est fait par un conseiller, l'agriculteur ajuste les doses en fonction des pluies réelles entre deux visites de son conseiller. Pour cela, une méthode simple est proposée, elle est affichée dans la feuille de conseil.

2 Mode d'utilisation de l'outil

Dans la page d'accueil du logiciel OSIRI-Run, cinq fonctions sont proposées: (i) création ou suppression de secteurs d'irrigation, (ii) saisie des pluies ou des irrigations, (iii) calculs et édition du bilan hydrique et du conseil, (iv) impression et exportation de données, et de conseils, (v) fermeture de la fenêtre, quitter OSIRI-Run. Une aide contextuelle et un guide d'utilisateur (Chopart *et al.*, 2005) sont disponibles. Le maniement de l'outil ne demande que des notions de base en bureautique, en particulier d'Excel®. L'outil OSIRI-Run peut être décomposé en 9 modules dont le contenu est décrit dans le paragraphe 23. La figure n°1 donne une vue générale de l'organigramme d'OSIRI-Run avec les liaisons entre les modules :

- 1 Paramètres d'entrée des modèles (environnementaux, techniques, culturels)
- 2 Modèle de simulation du bilan hydrique
- 3 Algorithmes de calcul des doses d'irrigation
- 4 Visualisation des résultats du bilan hydrique et des conseils, stockage des données
- 5 Création de la fiche de conseil
- 6 Décision de l'agriculteur, actions
- 7 Saisie des données de terrain (pluies et doses d'irrigation)
- 8 Calcul périodique du bilan hydrique avec les données réelles
- 9 Ajustement simple de l'irrigation entre deux calculs du bilan hydrique.

Si l'agriculteur est équipé d'un micro-ordinateur et formé au maniement d'OSIRI-Run, il peut gérer seul tous les modules de l'outil, conçu pour faciliter cette appropriation. Sinon, il doit être aidé par un agent de développement. Cet agent gère alors, avec son micro-ordinateur, la partie d'OSIRI-Run correspondant aux modules 1 à 5 (Fig.1), jusqu'à l'édition du conseil. Les modules 6 à 9 correspondent à des décisions et des actions de l'agriculteur. Les modules 4 et 5 sont des espaces de dialogue entre le conseiller agricole et l'agriculteur pour : (i) définir les paramètres d'entrée de l'outil, en particulier les caractéristiques du dispositif et la stratégie de l'agriculteur, (ii) commenter la fiche de conseil et procéder aux adaptations souhaitées par l'agriculteur.

Dans la pratique, l'agriculteur, seul ou avec un conseiller, commence par créer un nouveau dossier contenant tous ses secteurs d'irrigation soumis à un même climat et il renseigne les éléments du module 1 (figure 1). Après avoir modélisé un bilan hydrique prévisionnel (module 2), OSIRI propose un calendrier prévisionnel (module 3). Ceci se répète pour tous les tours d'eau jusqu'à la récolte. Le module 4 permet de voir si le dispositif et les choix de départ permettent des irrigations conformes aux souhaits. Sinon, il est possible d'ajuster la stratégie en modifiant des éléments du module 1 (Fig.1). Quand le calendrier prévisionnel d'irrigation est conforme, des fiches de conseil sont éditées (module 5). Avec ces éléments d'aide à la décision, l'agriculteur programme ses irrigations en début de période de conseil (module 6). Il relève ensuite les volumes d'eau consommés ainsi que les pluies au cours de la période concernée (module 7). L'agriculteur a, alors, deux possibilités (module 8) : (i) soit il effectue un nouveau calcul du bilan avec les doses réelles de pluies et d'irrigation (retour au module 2) pour le conseil suivant, (ii) soit il procède lui-même à un ajustement par une méthode simplifiée (module 9).

Ce choix entre deux méthodes de calculs des doses permet une grande souplesse dans la récurrence de l'édition des conseils par des conseillers agricoles, car la procédure simplifiée permet des ajustements par l'agriculteur lui-même. La fréquence des conseils peut aller de un par an à un par période de 5 jours. Dans les conditions locales, il est conseillé de recalculer le bilan hydrique tous les mois.

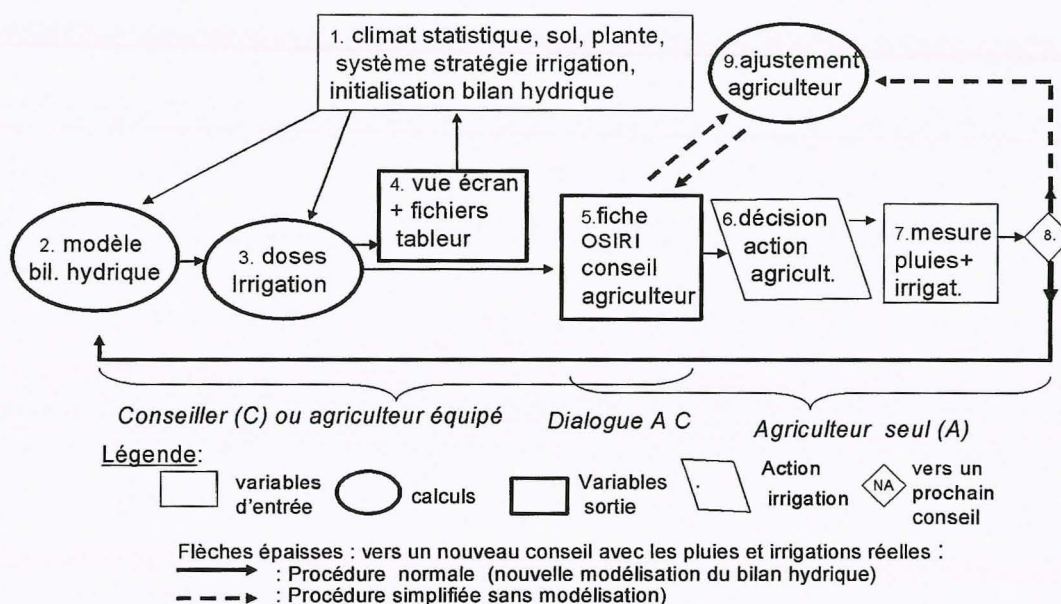


Figure 1. Organigramme simplifié d'OSIRI-Run. La ligne basse permet de délimiter la partie gauche avec les modules nécessitant l'utilisation d'un micro-ordinateur et la partie droite qui est le travail de l'agriculteur. Au milieu, les modules 1 et 5, sont des interfaces entre le conseiller agricole et l'agriculteur.

3 Contenu des différents modules d'Osiri-Run

31 Paramètres d'entrée pour le bilan hydrique et le calcul des doses (module 1)

Pour faire fonctionner le modèle de bilan hydrique et pour proposer des doses d'irrigation, il faut des informations communes à l'ensemble des secteurs d'un dossier (climat) ou spécifiques au secteur.

Un dossier est constitué de un ou plusieurs secteurs de même climat. Il s'agit généralement des différents secteurs d'une ferme. Les données climatiques prévisibles par période de 10 jours sont la pluie (nombre, hauteur), l'évapotranspiration potentielle, la température. Elles sont saisies ou importées et tirées d'études fréquentielles sur des séries climatiques. Pour leur utilisation, les pluies décadaires sont transformées en pluies par jour. Les pluies sont réparties de façon aléatoire dans la période de 10 jours.

Le système d'irrigation de chaque secteur de surface S (m^2) est caractérisé par: (i) le type de matériel (asperseur ou goutteur) et leurs caractéristiques, (ii) la façon dont l'agriculteur pilote son irrigation, (iii) l'efficacité de l'irrigation (IE), estimée à partir d'études locales, (iv) le débit d'eau disponible à l'entrée du secteur (DH, m^3/h) et le temps maximum (TI en h) de disponibilité, (v) le nombre de jours entiers entre deux irrigations possibles (DTE).

Les informations liées à l'hydrodynamique du sol sont la cote de drainage (ZD, cm), la réserve maximale en eau utile moyenne entre la surface et ZD (RU, mm/cm) et le coefficient d'évaporation sol nu par rapport à la PET (KS, entre 0.75 et 0, en fonction du nombre de jours après une pluie). La réserve maximale en eau utile cumulée entre la surface et la cote de drainage (MAWs, mm) se déduit de RU et de ZD. Pour initialiser le bilan hydrique, on définit une profondeur de front humide (front d'humectation) et un stock d'eau utile au début de la simulation.

Les informations relatives à la culture sont :

- les dates de plantation et de récolte prévisionnelle,
- le coefficient cultural (KC). Pour les valeurs de KC et leur évolution au cours du cycle, le logiciel propose plusieurs modes d'estimation dont celui de la FAO (Doorenbos and Pruitt, 1977).
- le système racinaire : profondeur du front racinaire au début des calculs (ZR_0), vitesse de progression (VRG) et âge d'arrêt de croissance.

Les irrigations maintiennent le stock d'eau du sol entre deux limites haute et basse (Fig. 2). Le niveau haut, à ne pas dépasser par l'irrigation, est le taux de remplissage (TR, % de MAWs). Le stock d'eau doit rester en dessus d'un niveau choisi (SD, % de MAWs).

Le front d'humectation est l'épaisseur de sol plus ou moins humide entre la surface et la cote de drainage permettant la croissance des racines. Elle constitue à la fois la limite de la réserve d'eau potentiellement disponible pour la plante, s'il y a des racines, et la profondeur maximale de croissance du front racinaire.

Sur repousse de canne à sucre, on considère généralement que la profondeur de ce front d'humectation est égal à celle de la cote de drainage.

32 Modèle de bilan hydrique (module 2)

Dans le modèle PROBE, le sol est assimilé à deux réservoirs d'eau. Le premier, de nature statique, est caractérisé par une réserve maximale en eau utile (MAWs), entre la surface et la cote de drainage (ZD). Le second (MAW_{sr_i}) dépend de la profondeur du front racinaire (ZR_i). Ce front de profondeur initiale ZR_0 , évolue dans le temps (j) à une

vitesse VRG jusqu'à ce que $ZR_j = ZD$, à condition que ZR_j n'atteigne pas le front d'humectation. Ce réservoir a une réserve maximale en eau utile obtenue par : $MAW_{sr_i} = RU * ZR_i$. Quand $ZR_i = ZD$, les deux réservoirs sont confondus (Fig.2).

La profondeur du système racinaire (ZR_j) ne peut être plus grande que celle du front d'humectation (ZWF_j) calculé par :

$$ZWF_j = S_j + (R_j + I_j) ZD / MAWS \quad [1]$$

L'intégration de la loi de la conservation de la masse entre la surface et les profondeurs ZR_i et ZD conduit à :

$$SR_{j+1} = SR_j + R_j + I_j + MAW_{sr_{j+1}} - MAW_{sr_j} - DR_j - AET_j \quad [2]$$

et

$$ST_{j+1} = ST_j + R_j + I_j - DT_j - AET_j \quad [3]$$

où ST_j et SR_j sont respectivement les stocks d'eau utile (mm) totaux et dans la zone racinaire, au début du jour j . Durant le jour j , R_j et I_j sont les hauteurs de pluie et d'irrigation, DR_j et DT (mm) sont les pertes en dessous de ZR_j et ZD respectivement et AET_j (mm) est l'évapotranspiration réelle. Les équations [2] et [3] supposent un ruissellement négligeable. Les stocks d'eau doivent satisfaire les contraintes suivantes :

$$0 < SR_j < MAW_{sr_j} \text{ et } 0 < ST_j < MAWs \quad [4]$$

L'estimation du drainage est fondée sur le remplissage des deux réservoirs jusqu'à leur valeur maximale (Fig.2). Ceci conduit aux algorithmes [5] et [6] suivants :

(i) pour le réservoir racinaire dépendant du temps :

$$\text{si } SR_j + R_j + I_j + MAW_{sr_{j+1}} - MAW_{sr_j} < MAW_{sr_j} \text{ alors } DR_j = 0 \quad [5a]$$

$$\text{sinon : } DR_j = SR_j + R_j + I_j - MAW_{sr_j} \quad [5b]$$

(ii) pour le réservoir statique (DT_j) :

$$\text{si } ST_j + R_j + I_j < MAWs, \text{ alors } DT_j = 0 \quad [6a]$$

sinon le drainage à la base du profil est calculé par :

$$DT_j = ST_j + R_j + I_j - MAWs \quad [6b]$$

L' AET_j est estimée à partir de la fonction empirique d'Eagleman (1971). Fondée sur une analyse de données issues d'une large gamme de conditions climatiques et de cultures, elle dépend de l'évapotranspiration maximale MET_j , en mm et de l'humidité relative du sol (SMR_j) :

$$AET_j = \alpha + \beta SMR_j + \gamma (SMR_j)^2 + \delta (SMR_j)^3 \quad [7]$$

Les coefficients α , β , γ et δ sont des fonctions de MET_j (Eagleman, 1971; Chopart et Vauclin, 1990).

L'humidité relative du sol est définie par :

$$SMR_j = (SR_j + R_j + I_j - DR_j) / MAW_{sr_j} \quad [8]$$

D'après les Eqs. [4] et [5], elle varie de 0 à 1.

L'évapotranspiration maximale de la culture est définie par :

$$MET_j = \max (KC_j ; KS_j) * PET_j \quad [9]$$

où PET_j est l'évapotranspiration potentielle, KC et KS , les coefficients culturaux et d'évaporation sol nu.

Dans le calcul du bilan hydrique, le coefficient cultural KC peut être décrit par différentes méthodes. Pour les KC de type FAO, escalier et somme de températures, il évolue normalement en fonction des paramètres saisis. Pour le type Irricanne, il dépend de la réserve utile. Sur la période de K croiss à K max, l'évolution du KC est bloquée si le rapport ETR/ETM est inférieur à 0.5.

A coté du coefficient cultural, le modèle de bilan hydrique fait appel à un second coefficient décrivant l'évaporation du sol nu (KS) comme une fraction de l'ETP. Ce coefficient diminue en fonction du nombre de jours sans pluie ou sans irrigation par aspersion. Il est calculé quotidiennement avec la formule :

$$KS : = b \times (e^{-A \times JA}) \quad [10]$$

Avec

$A : 0.76$

b : coefficient d'atténuation de la pluie ou de l'irrigation fixé ici à 0.7

JA : nombre de jours après l'irrigation ou après la pluie

Ce coefficient permet de prendre en compte une MET plus forte après un épisode humide (pluie ou irrigation par aspersion) ; il décroît très rapidement ensuite.

Pour un climat (R , I , PET) d'un jour j , et SR_j et ST_j étant connus le matin de ce jour, les Eqs.[5] et [6] calculent le drainage à la base des deux réservoirs. Les Equations. [7], [8] et [9] donnent alors l' AET_j . Les réserves d'eau en fin de jour, SR_{j+1} et ST_{j+1} , sont obtenues par les Eqs.[2] et [3] avec la contrainte [4]. En plus des conditions initiales SR_0 , ST_0 , ZR_0 , le modèle nécessite la connaissance des seules grandeurs ZD , $MAWs$, KS_j pour le sol, ZR_j , et KC_j pour la culture et R_j , I_j et PET_j pour le climat.

Plus de détails sur le fonctionnement du modèle figurent dans Chopart et Siband (1988) et dans Chopart et Vauclin (1990).

Le modèle est simple et robuste. Il ne nécessite que des variables d'entrée facilement accessibles sur le terrain ou, à défaut, dans la littérature. En revanche, il ne peut simuler ni les remontées capillaires ni le ruissellement. Le modèle PROBE a été validé en milieu tropical (Chopart et Vauclin, 1990, Chopart *et al.* 1991), peu différent de celui de la Réunion. Il a également été utilisé pour des applications agronomiques (Chopart *et al.* 1991 ; Chopart et Kone, 1994).

33 Calcul des doses d'irrigation à apporter (module 3)

La première étape concerne la décision d'irriguer ou non en fonction du niveau de la réserve hydrique du sol par rapport aux limites fixées. La dose à apporter est calculée en mm, puis dans l'unité de l'irrigation.

Le module de bilan hydrique (Eq.[1 à 8]) permet d'estimer chaque jour le niveau des réserves en eau utile SR_j . Le jour où une irrigation est possible, la décision d'irriguer est prise en fonction de SR_j en début de tour d'eau, des cumuls de la MET et des pluies (PPt) prévues au cours de la durée du tour d'eau (DTE) à venir. La valeur de MET_j est constante pendant DTE. La MET cumulée pour la période est :

$$MET_p = MET_j * DTE \quad [11]$$

Le stock d'eau en début de période SR_d est celui du jour de l'irrigation, en fin de période (SR_f) il est :

$$SR_f = SR_d - MET_p + PPt \quad [12]$$

Les réserves en eau utile ne doivent pas ou peu s'abaisser en dessous d'un seuil (SD), donc : (i) si le stock final SR_f est supérieur au seuil de déclenchement SD, la hauteur d'eau à apporter (HIT_p) est nulle, (ii) si SR_f est inférieur ou égal à SD, HIT_p va servir à faire remonter la réserve hydrique du jour de l'irrigation (SR_d) jusqu'à TR (Fig.2). Cela conduit à l'équation suivante :

$$HIT_p = TR - SR_d - PPt \quad [13]$$

Il se peut que SR_f [Eq.10] atteigne une valeur nettement plus faible que SD (augmentation de MET/j par exemple), induisant alors des stocks d'eau trop bas (Fig.2). Pour maintenir la fluctuation de SR dans des limites permettant à la culture de rester dans des conditions hydriques optimales, un second seuil (SB), compris entre SD et 0, est défini en Eq.[14]. Si $SR_f < SB$, l'irrigation va faire remonter le stock d'eau au dessus de TR, d'une valeur SB, diminuée des pluies probables :

$$\begin{aligned} \text{Si } SD < MAWs - TR, \text{ alors : } SB &= SD \\ \text{sinon : } SB &= SD - (MAWs - TR) \end{aligned} \quad [14]$$

$$\begin{aligned} \text{Si } SR_f > SB, \text{ alors } HIT_p \text{ est calculé avec l'éq. [11]} \\ \text{sinon } HIT_p &= TR - SR_d + SB - PPt \end{aligned} \quad [14bis]$$

Le seuil SB est défini pour maintenir la culture dans des conditions hydriques optimales. Lorsque SB est égal à SD, la sur-irrigation n'ayant pas lieu, le niveau moyen de SR_f entre 2 irrigations va diminuer avec le risque d'attendre des périodes de stress hydrique sur la culture.

La hauteur d'eau d'irrigation théorique HIT_p est transformée en hauteur d'irrigation réelle HI_p (mm) avec l'efficience de l'irrigation (IE), en vérifiant que le dispositif d'irrigation peut fournir l'eau demandée :

$$HI_p = HIT_p / IE \quad [15]$$

La lame maximale d'eau à apporter par irrigation (HIM , mm) sur un secteur, est donnée par l'Eq.[16], avec DH le débit horaire disponible (m^3/h), TI la durée d'apport d'eau possible par irrigation (h) et S la surface du secteur (m^2). L'irrigation HI_p est limitée à HIM donc HI_p est donné par l'Eq.[17].

$$HIM = DH * TI * 1000 / S \quad [16]$$

$$HI_p = \text{Min} (HI_p, HIM) \quad [17]$$

La hauteur d'irrigation (HI_p) ainsi calculée, le logiciel effectue une simulation du bilan hydrique (Eqs.[2 à 9]) entre deux irrigations, avec cette irrigation et les pluies journalières prévues au cours du tour d'eau. Il estime ainsi le stock d'eau et le déficit en fin de période, permettant le calcul d'une nouvelle dose d'irrigation pour le tour d'eau suivant. Le processus se répète jusqu'à la récolte.

En fin de cycle, il est souhaitable de faire subir à la canne à sucre un stress hydrique maîtrisé pour faciliter l'enrichissement en sucre (Humbert, 1968). Cela peut aussi concerner d'autres cultures pour faciliter la maturation, ou la lutte contre les parasites. L'agriculteur peut définir dans OSIRI-Run un niveau très bas de remplissage de la réserve en eau du sol (SS) à atteindre en fin de cycle (Fig.2). En cours de cycle, le logiciel procède, en parallèle, à un calcul du bilan hydrique avec les mêmes algorithmes (Eqs.[2 à 12]) mais en l'absence d'irrigation. Quand, par cette simulation, le seuil SS est atteint seulement en fin de cycle, il est proposé d'arrêter les irrigations, la fin du cycle étant alors en conditions pluviales. Il suffit de définir une même valeur de SD et de SS pour que cette fonction ne soit pas activée.

Tous les calculs des besoins en irrigation ont été, jusqu'à présent, effectués en mm d'eau. L'outil propose des doses d'irrigation dans l'unité de programmation de l'irrigation et pour la surface du secteur. Pour cela, il suffit d'affecter un coefficient transformateur à HI_p . Les valeurs de DI_p sont obtenues par [18a] pour le pilotage en volume et par [18b] pour le calcul en temps, avec DH le débit horaire (m^3/h) :

$$DI_p = 0.001 * S * HI_p \quad [18a]$$

$$DI_p = 0.001 * S * HI_p / DH \quad [18b]$$

Afin d'aider l'agriculteur dans sa prise de décision, la fiche de conseil OSIRI-Run affiche une dose d'irrigation (HI_{pm}) qui est le maximum entre deux valeurs : (i) la MET_p cumulée du tour d'eau, (ii) le cumul de HI_p et de la pluie prévue pour le tour d'eau suivant. Le maintien de la culture à sa MET est alors assuré par l'irrigation, même en absence de pluie. Le stock d'eau utile atteint par HI_{pm} est toutefois limité par la capacité d'accueil du sol, au-delà, l'eau d'irrigation est perdue. On a donc l'algorithme suivant :

$$HI_{pm} = \text{min} \{ \text{max} [(HI_p + PPt) ; MET_p] ; (MAWS - TR) \} \quad [19]$$

avec HI_p : hauteur conseillée, PPt : pluie prévue pour le tour d'eau, MET_p : MET pour le tour d'eau.

L'irrigation maximale HI_{pm} , devient après transformation (eq.[18]), la dose maximale d'irrigation (DI_{pm}). Une irrigation supérieure à DI_{pm} est inutile, même si la pluie de la période à venir est nulle.

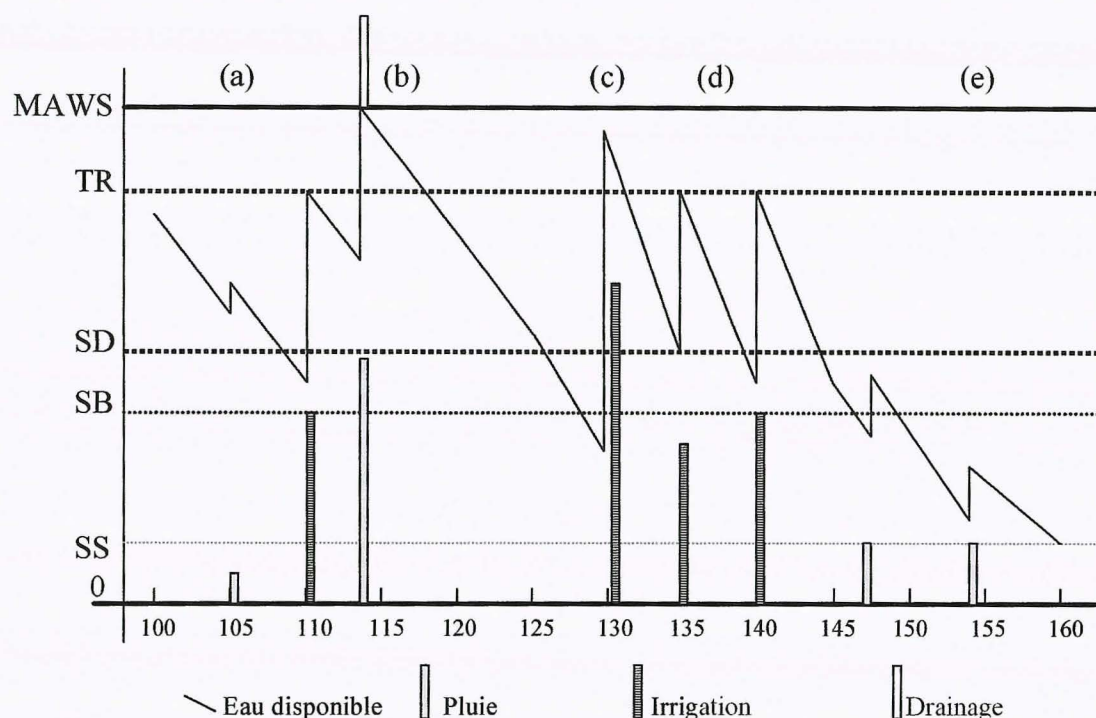


Figure 2. Exemple simplifié de la fluctuation du stock d'eau disponible (SR) dans le sol, modélisée et visualisée dans OSIRI-Run, avec MAWS : réserve maximale d'eau utile du sol entre la surface et la cote de drainage en mm. Entre les deux niveau extrêmes (0 et MAWS) différents niveaux sont définis : le taux de remplissage par un irrigation (TR), le seuil de déclenchement d'une irrigation (SD), le seuil bas de déclenchement d'une irrigation surdimensionnée (SB), un niveau très bas éventuellement recherché en fin de cycle, avec stress hydrique (SS) toutes ces valeurs sont en mm. Plusieurs situations contrastés sont représentés (a) : petites pluie et irrigations, (b) : pluie produisant du drainage et un arrêt des irrigations, (c) : SB est atteint avec une irrigation aboutissant à $SR > TR$, (d) : période sans pluie, (e) assèchement programmé du profil jusqu'à SS, en fin de cycle.

34 Visualisation du bilan hydrique avec les doses irrigations, (modules 4 et 5)

Il est possible de visualiser et d'imprimer les variables du bilan hydrique et les doses conseillées. La visualisation du bilan hydrique prévisionnel pour l'ensemble du cycle permet, en début de cycle, de vérifier la capacité du système d'irrigation à maintenir la culture à l'évapotranspiration maximale avec les caractéristiques du dispositif et des choix de l'agriculteur. Sinon, il faut modifier des éléments (tour d'eau, durée maximale d'irrigation, seuils de remplissage du réservoir). Il est possible de tester différents scénarios. Le stockage de toutes les données dans un tableur permet une mémorisation en vue d'analyse.

Les doses d'irrigation sont mises en forme pour fournir un calendrier d'irrigation simple et lisible, dans l'unité de programmation de l'irrigation et pour la surface du secteur. Deux fiches sont proposées. L'une porte sur l'ensemble du cycle cultural, l'autre est un conseil par mois. Le conseil annuel contient un tableau avec autant de colonnes que de périodes d'irrigation (Fig.3A). Si la durée du tour d'eau (DTE) est inférieure à 5 jours, la durée de la période de conseil est un multiple de DTE. Les lignes donnent les informations suivantes: (i) date de la prochaine irrigation ou de début du tour d'eau, (ii) pluie probable au cours de la période suivante, (PPp), (iii) dose d'irrigation conseillée pour la période suivante (DI_p), (iv) dose d'irrigation maximum pour la période de date à date suivante (DI_{pm}). Les conseils annuels par secteur sont contenus dans une feuille A4. La fiche mensuelle donne les informations (i) et (iii) pour tous les secteurs d'un même fichier.

35 Fiches de conseil (module 5)

- Affichage de la dose

Dans le cas de l'édition du conseil annuel, la dose d'irrigation est affichée par périodes. Pour un tour d'eau de moins de 5 jours, la dose d'irrigation présentée est la moyenne des doses calculées par tour d'eau sur la période du conseil. Pour un tour d'eau égal ou supérieur à 5 jours, la dose affichée est celle du tour d'eau.

A l'affichage du conseil annuel, les doses d'irrigation sont proposées selon trois polices différentes :

- Couleur noire : dose respectant les bornes définies
- Couleur bleue gras sur fond gris : dose réduite.

Une dose d'irrigation est réduite lorsqu'elle dépasse la limite du nombre d'heures maximum. Pour des tours d'eau de moins de 5 jours, la dose moyenne est affichée réduite quand le nombre de doses réduites est supérieur ou égal à la durée de la période conseillée/ (2* tour d'eau)

- Couleur rouge soulignée : arrêt d'irrigation lié au sevrage de la culture

36 Actions de l'agriculteur et recalcul du bilan hydrique (modules 6, 7, 8)

Avec cette fiche, l'agriculteur possède des éléments pertinents pour prendre ses décisions. Mais il ne va pas forcément suivre ce conseil. Il est, en effet, soumis à des contraintes diverses, de temps de travail, de pannes, par exemple, ce qui est impossible à modéliser avec OSIRI-Run. En fin de tour d'eau, il relève le volume d'eau apporté ainsi que la pluie enregistrée. Si l'agriculteur ne peut relever chaque irrigation, il est possible de saisir le cumul des doses entre deux dates. Avec ce cumul et des caractéristiques du dispositif, l'outil recrée un calendrier d'irrigation entre ces deux dates. Si l'agriculteur ne peut relever les pluies, elles seront estimées à partir du poste météorologique le plus proche.

En fin de période de conseil, l'agriculteur va prendre une nouvelle décision pour l'irrigation de la période suivante. La procédure optimale de l'outil OSIRI-Run est de refaire un nouveau bilan hydrique. Si cette opération peut être réalisée par l'agriculteur, la récurrence du calcul peut être grande. Sinon la mise à jour du bilan sera faite à chaque passage d'un conseiller et l'intervalle entre calculs peut être plus long. C'est pourquoi, une méthode alternative simplifiée d'ajustement des doses est proposée (module 9).

37 Ajustements de l'irrigation entre deux calculs du bilan hydrique (module 9)

La méthodologie se veut aussi simple que possible pour être utilisable par l'agriculteur après une courte formation. Pour cela, des simplifications et donc des approximations sont introduites par rapport à la procédure standard. La principale consiste à cumuler les pluies d'une période de conseil. La dose unitaire d'irrigation réelle ajustée (AD_p) vise à compléter, par l'irrigation, un cumul de pluies réelles, différent de celui attendu (Fig. 3C). Elle est calculée par :

$$AD_p = (PP_p - PR_p) * a + DI_p \quad [20]$$

où PP_p et PR_p sont respectivement le cumul des pluies prévues et réelles de la période, DI_p la dose d'irrigation conseillée. Le coefficient a permet de passer des lames d'eau en mm à des volumes d'eau dans l'unité de programmation de pilotage de l'irrigation.

Les valeurs de PP_p et de DI_p figurent dans la fiche de conseil, PR_p est la pluie relevée. Le coefficient a fluctue d'un secteur d'irrigation à l'autre. Il est calculé par OSIRI et figure dans la fiche de conseil. Par exemple, pour une programmation en volume d'eau (m^3), a_v , est :

$$a_v = (0.001 * S / EF) / NIP \quad [21]$$

où NIP est le nombre d'irrigations possibles pendant la durée du conseil dans la fiche .

Si $AD_p < 0$, d'après les Eqs. [18], [19] et [20], PR_p a fait dépasser la réserve hydrique SR au delà du seuil TR déjà atteint avec l'équivalent de la pluie attendue PP_p (Fig.4A). L'irrigation est donc arrêtée. La valeur absolue de AD_p correspond à la hauteur d'eau au dessus de TR (Fig.4A) et devient de l'eau valorisable EV (mm). Le nombre de jours d'arrêt de l'irrigation (NJAI) correspond au temps mis par SR pour atteindre le seuil de déclenchement SD, avec l'AET_j égale à la MET_j (Fig.4B). Mais la valeur EV doit être inférieure à la capacité de stockage du réservoir CAP situé entre TR et MAWs :

$$CAP = MAWs - TR \quad [22]$$

Le calcul de NJAI dépend donc de CAP et de EV (Fig. 3 C et 4B). Si $EV < CAP$, CAP peut stocker tout EV, le volume total d'eau disponible est le réservoir de stockage de l'irrigation (TR-SD), augmenté de EV :

$$NJAI = (TR - SD + EV) / MET_j \quad [23a]$$

Si $EV > CAP$, la MAWs est dépassée, l'eau utile est limitée à MAWs :

$$NJAI = (MAWS - SD) / MET_j \quad [23b]$$

Les valeurs numériques de CAP, (TR-SD), (MAWs-SD) apparaissent dans la feuille de conseil (Fig. 3C). Elles sont calculées par OSIRI-Run pour chaque secteur d'irrigation. Une valeur par défaut de MET_j est aussi proposée. L'agriculteur n'a qu'à transformer le ADp de son tableau en une valeur positive (EV) et faire les calculs simples de l'Eq.[23]. S'il pleut à nouveau pendant cette période, une procédure d'estimation de la prolongation de NJAI est proposée. Elle est considérée comme extérieure à l'outil OSIRI-Run, même si sa feuille de conseil permet d'obtenir des éléments du calcul. Il est conseillé de calculer le bilan hydrique pour estimer la date de reprise de l'irrigation.

4 procédures annexes. (date de sevrage, gestion de fichier)

- Calcul de la date d'arrêt d'irrigation en fin de cycle.

Un bilan hydrique parallèle au calcul du bilan hydrique quotidien est déclenché lorsque la condition suivante est vérifiée :

$$LS - (MAWs / ETR) < JAC$$

[24]

Avec :

LS : la durée du cycle de la culture en jour

MAWs : RU en mm

JAC nombre de jours après coupe

ETR évapotranspiration réelle de la culture en mm ; fixée à 1 mm pour cette procédure

Ce calcul parallèle du bilan hydrique est réalisé sans irrigation avec les valeurs météo statistiques pour aboutir, à la date de récolte prévisionnelle, à la valeur configurée pour la réserve utile. Cette procédure fournit la date d'arrêt d'irrigation optimale en fonction des pluies prévisionnelles.

A l'édition du conseil, les doses d'irrigation sont nulles, affichées en rouge et soulignées.

-Gestion de fichiers.

En début de calcul Osiri-Run procède à un bilan hydrique prévisionnel fondé sur des éléments statistiques du climat ce qui conduit à un conseil pour le reste du cycle. Ce bilan hydrique ne sera plus mis à jour au cours du cycle, permettant de garder la mémoire de ce bilan prévisionnel

En revanche, à chaque mise à jour du bilan hydrique et à chaque calcul du conseil, Osiri mémorise dans des fichiers datés, les bilans hydriques réalisés et conseillés, entre le deux dates de mise à jour. Cette procédure permet de tenir compte des modifications apportées dans un bilan hydrique conseillé. Elle permet aussi un gain de temps en cas de recalcul des bilans.

- Unités d'irrigation :

Il n'est pas possible de modifier en cours de cycle, l'unité d'irrigation (temps, volume ou millimètre). En cas de nécessité, l'utilisateur doit convertir les irrigations dans une autre feuille Excel pour ensuite les importer dans la feuille de saisie des irrigations.

a

Date début du tour d'eau.	16-janv	22-janv	28-janv	03-fév	09-fév
Pluie attendue (mm/) PPp	13	4	20	5	8
Irrigation conseillée (m ³) DIp	23	0	0	17	12
Irrigation réelle (m ³) ADp					
Irrigation maxi (m ³) HIpm	27	22	23	15	15

b

Calcul dose irrig. ajustée ADp	PPp	PRp	PPp-PRp	a	(PPp-PRp)*a	+ DIp =	ADp
				3			

c

Si DR<0, calcul NJAI	EV= ADp	CAP	Si EV>CAP	Si EV< CAP
Nb. Jours Arrêt Irrig :		30	NJAI= 80/6	NJAI= (50+EV*1)/6

Figure 3. Exemple d'un conseil annuel OSIRI-Run. a : Calendrier d'irrigation, les lignes donnent la date de la prochaine irrigation, la pluie probable au cours de la période suivante (PPp), la dose d'irrigation conseillée pour la période suivante (DIp), la dose réelle apportée (à remplir), la dose d'irrigation maximum pour la période de date à date suivante (DIpm). b : Ajustement des irrigations (ADp) entre 2 calculs du bilan hydrique. c : Calcul du nombre de Jours d'Arrêt d'Irrigation NJAI si ADp < 0.

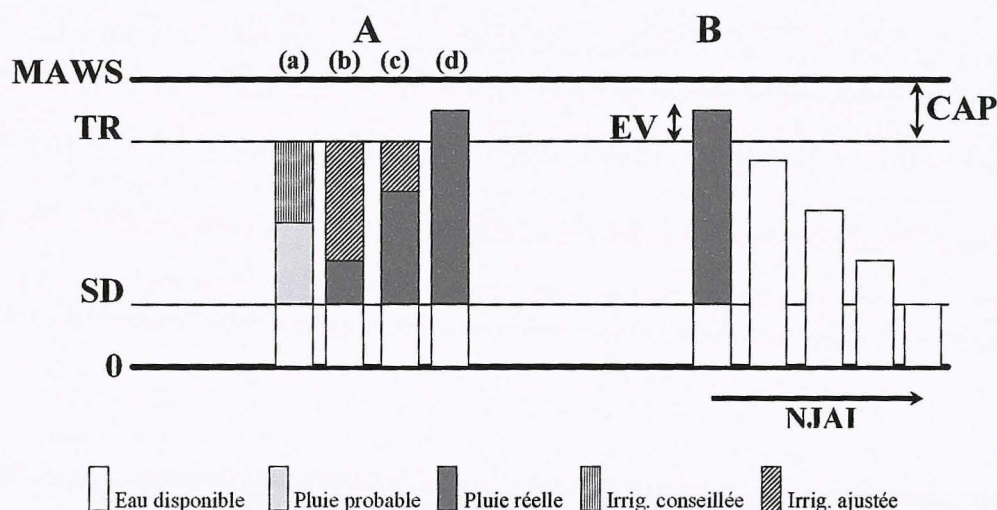


Figure 4. A : calcul de la dose d'irrigation ajustée par l'agriculteur. En (a) : la dose conseillée par OSIRI-Run permet au stock d'eau utile d'atteindre le niveau TR, compte tenu de la pluie probable PPp. En (b) et (c) : la pluie réelle PRp est différente de PPp, mais le stock d'eau n'atteint pas TR, l'irrigation ajustée permet au stock d'atteindre TR. En (d) la pluie réelle a entraîné le dépassement du niveau TR : l'irrigation est donc momentanément arrêtée. B : calcul du nombre de jours d'arrêt de l'irrigation (NJAI) dans le cas (d). Dans la limite de CAP, le stock EV est de l'eau utilisable à ajouter à TR pour le calcul de NJAI. Le stock s'abaisse chaque jour de l'évapotranspiration maximale du jour, jusqu'au seuil SD.

-Modifications du paramétrage:

La modification de paramètres de configuration en cours de cycle est possible mais n'entraîne pas la mise à jour des bilans hydriques précédemment conseillés. La modification du bilan hydrique consécutive, sera intégrée lors du conseil suivant.

S'il est nécessaire de procéder à une modification des paramètres de configuration depuis la date de début des calculs, il faut saisir une irrigation (éventuellement nulle) à la date de début des calculs. L'ensemble des bilans hydriques (réalisés, conseillés et prévisionnel) intégreront alors le changement de paramétrage.

DISCUSSION CONCLUSION

Le service de développement agricole de la Réunion (Chambre d'Agriculture) souhaitait disposer d'un outil de conseil en irrigation adapté aux caractéristiques et aux contraintes locales, plus précis que celui actuellement utilisé, tout en restant simple. L'outil proposé, OSIRI-Run, tente de répondre à cette demande. La Chambre d'Agriculture a, dès le départ, fait partie du projet. Cette démarche ascendante avec des feed-back vers les acteurs du développement et les agriculteurs a facilité l'ajustement de l'outil à la demande. Des premiers tests effectués chez des producteurs avec la version provisoire (β) de l'outil ont permis de recueillir leurs avis et souhaits. En plus de répondre aux exigences du cahier des charges défini au départ, l'outil OSIRI-Run a des fonctions non expressément demandées et absentes des outils de conseils disponibles à la Réunion. Il s'agit de : (i) l'accès facile aux termes du bilan hydrique prévisionnel pour l'ensemble du cycle, pour une aide à la stratégie d'irrigation, (ii) un ajustement direct par l'agriculteur grâce à certains éléments issus des modélisations précédentes, (iii) les consommations éditées par mois pour l'exploitation, (iv) une modélisation de la date optimale d'arrêt des irrigations afin de créer un déficit hydrique en fin de cycle. Ceci est important pour la canne à sucre, mais peut concerner d'autres cultures.

Parallèlement à sa finalisation, une première évaluation de l'OSIRI-Run en comparaison avec l'outil actuel (conseil ETM) a été menée pendant presque un cycle cultural (un an) dans un champ d'agriculteur. Les premiers résultats qui figurent dans l'article scientifique de présentation d'OSIRI-Run (Chopart et coll, 2006, à paraître) montrent l'aptitude d'OSIRI-Run à proposer des doses d'irrigation plus faibles que l'outil actuel, sans réduction de l'ETR, en réduisant le drainage. Des résultats plus complets seront publiés prochainement avec ceux de tests et d'enquêtes chez les agriculteurs utilisateurs. La simplicité recherchée de l'outil implique quelques approximations et limitations. Ainsi les paramètres utiles au bilan hydrique et à l'élaboration du conseil sont supposés homogènes à l'intérieur d'un secteur d'irrigation. Toutefois, s'il existe une forte hétérogénéité, le modèle de bilan hydrique PROBE peut être utilisé dans une version stochastique (Vauclin et Chopart, 1991). C'est envisageable grâce à la parcimonie des variables du modèle et à sa simplicité conceptuelle. Le ruissellement est supposé nul s'il ne peut être négligé, il faut l'estimer par des mesures ou par modélisation. Il suffit alors d'introduire, dans OSIRI-Run, la pluie diminuée du ruissellement. La non prise en compte des remontées capillaires dans le bilan hydrique n'est pas aussi pénalisante ici qu'en culture pluviale sèche, car les flux hydriques sont principalement descendants. Les secteurs d'irrigation reliés à une même source sont considérés comme indépendants. En cas de partage de la ressource par plusieurs secteurs d'irrigation, il faut calculer,

localement, le débit et le temps d'irrigation disponibles pour chaque secteur. Ce calcul, difficile à modéliser est, en général, simple au niveau de l'exploitation.

L'outil permet une grande souplesse dans la récurrence de l'édition des conseils, car une procédure simplifiée permet des ajustements par l'agriculteur. La fréquence des conseils peut aller de un par an à un par période de 5 jours. La qualité du conseil dépend néanmoins de sa fréquence. La procédure allégée d'ajustement entre deux conseils ne peut, en effet, prétendre à la même pertinence. Actuellement le conseil OSIRI-Run aux agriculteurs se fait sur support en papier, pour répondre à leur demande immédiate. La simplicité de ce conseil fait que l'on peut envisager de le diffuser par d'autres moyens modernes (SMS, Internet).

L'outil a été mis au point pour les agriculteurs cannières de la Réunion (France) et il y est déjà utilisé à titre expérimental par environ 20 agriculteurs. Mais il n'est spécifique ni de la canne à sucre, ni de l'environnement physique et humain de cette île. Adapté aux difficiles conditions locales, il devrait l'être à d'autres situations moins contraignantes.

LISTE DES SYMBOLES

a	coefficient de passage des mm à des doses, dans l'unité d'irrigation
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$	coefficients du polynôme d'Eagleman (eq.[6])
AD _p	irrigation ajustée par la procédure simplifiée, dans l'unité d'irrigation
AET	évapotranspiration réelle de la culture (ETR), mm
CAP	partie du réservoir d'eau entre TR et MAWS, (MAWS-TR), mm
DAR	nombre jours après le début de la repousse de la canne à sucre
DH	débit horaire par secteur, m ³ /h
DI _p	dose d'irrigation à apporter, dans l'unité de pilotage de l'irrigation
DI _{pm}	dose maximale d'irrigation à apporter, dans l'unité de pilotage de l'irrigation
DR	pertes d'eau par drainage en dessous de ZR _j , mm/j
DT	pertes d'eau par drainage en dessous de ZD, mm/j
DTE	durée du tour d'eau (intervalle entre 2 irrigations possibles), j
EV	eau potentiellement valorisable, mm
HIM	volume maximum d'eau d'irrigation utilisable, m ³ /jour/ secteur d'irrigation
HIT _p	hauteur théorique d'irrigation pour la période entre deux irrigations, mm
HI _p	hauteur d'irrigation pour la période entre deux irrigations, mm
HI _{pm}	dose maximale d'irrigation pour la période entre deux irrigations, mm
I	irrigation unitaire (modèle PROBE), mm/j
IE	efficience de l'irrigation, %
j	jour
KC	coefficient cultural, entre 0 et KC maximum
KS	coefficient d'évaporation du sol, entre 0 et 1
MAW _s	réserve maximale d'eau utile du sol entre la surface et ZD, mm
MAW _{rs}	réserve maximale d'eau utile du sol entre la surface et ZR, mm
MET	évapotranspiration maximale de la culture, mm
NIP	nombre d'irrigations possibles au cours de la période du conseil
NJAI	nombre de jours d'arrêt de l'irrigation
p	durée de la période de conseil en irrigation
PET	évaporation potentielle, mm
PP _p	cumul des pluies prévues pour la période du conseil, mm
PP _t	pluie prévue, cumul pour la durée du tour d'eau (DTE), mm
PP _u	pluie unitaire prévue, mm/j
PR _p	cumul des pluies réelles mesurées pour un période du conseil (DPC), mm
R	pluie unitaire par jour (modèle PROBE), mm/j
RU	réserve en eau utile du sol, mm par cm de sol
S	surface d'un secteur d'irrigation, m ²
SB	seuil bas de déclenchement d'une irrigation surdimensionnée, mm
SD	seuil de déclenchement, mm
SMR	humidité relative du sol (modèle PROBE, Eq.[7]), entre 0 et 1
SR	eau utile dans la zone racinaire en début de journée (modèle PROBE), mm
SR _{d,f}	eau utile dans la zone racinaire en début et fin de tour d'eau, en mm
SS	niveau bas d'eau utile recherché en fin de cycle, avec stress hydrique
ST	eau utile totale en début de journée (modèle PROBE), mm
TI	temps d'irrigation possible par tour d'eau, heures
TR	taux de remplissage, en mm
VRG	vitesse de croissance du front racinaire, cm/j
ZD	profondeur de la cote de drainage, cm
ZR	profondeur du front racinaire, cm
ZWF _j	profondeur du front d'humectation du sol, cm

REFERENCES

- Addiscott TM., Wagenet RJ. 1985. Concepts of solute leaching in soils: A review of modelling approaches. *J. Soil Sci.* **36**:41-424.
- Chopart JL., Le Mézo L., Mézino M. 2005. Guide de l'utilisateur. OSIRI-Run : Outil simplifié pour une irrigation raisonnée et individualisée. *Scientific Paper, CIRAD-Réunion (France)*: 30p.
- Chopart JL., Koné D. 1994. Fluctuation de l'alimentation hydrique du maïs en centre Côte d'Ivoire. In: *Bilan hydrique et sécheresse en Afrique tropicale*. John Libbey Eurotext Ed. Paris: 39-47.
- Chopart JL., Mézino M., Le Mézo L. 2002. Relations entre l'altitude et la température mensuelle dans l'Ouest de la Réunion. *Revue Agric. et Sucr. de l'Ile Maurice (Mauritius Island)*, **80** 3:68-72.
- Chopart JL., Mézino M., Nativel R. 2003. Fluctuation saisonnière de l'évapotranspiration (ET_0) en fonction de l'altitude dans l'Ouest et le Sud de l'Ile de la Réunion. Application à une modélisation empirique de l' ET_0 . Scientific Doc. CIRAD ST Pierre Réunion (France), 20 p.
- Chopart JL., Siband P. 1988. PROBE : PRogramme de Bilan de l'Eau. Présentation du modèle PROBE. *Mémoires et travaux de l'IRAT n°17*. Montpellier: CIRAD edit.: 76p.
- Chopart JL., Vauclin M. 1990. Water balance estimation model: field test and sensitivity analysis. *Soil Science Soc. Am. J.* **54** (5):1377-1384.
- Chopart JL., Vauclin M., Nicou R. 1991. Le bilan hydrique: dilettantisme ou nécessité pour comprendre les relations milieu physique-culture en zone tropicale sèche? In: « *Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone* », IAHS public. n°199, Wallingford IAHS edit. (England):345-357.
- Chopart J.L., Mézino M., Aure F., Le Mézo L., Mété M 2006. A simple tool of irrigation advice adapted to a heterogeneous environment and to small farmers. à paraître.
- Combres JC., Kamieniarz C. 1992. Un logiciel multi-parcelles et multi-utilisateurs d'avertissement en irrigation et de gestion des périmètres irrigués. *ICID Bulletin* **41** (2) :135-152.
- Doorenbos J., Pruitt WO. 1977. Crop water requirements. *FAO irrigation and drainage paper n°24*. FAO Rome (Italy), 193 p.
- Duwig C., Normand B., Vauclin M., Vachaud G., Green SR., Becquer T. 2003. Evaluation of the WAVE Model for predicting nitrate leaching for two contrasted soil and climatic conditions. *Vadose Zone J.* **2**:76-89.
- Eagleman J. 1971. An experimental derived model for actual evapotranspiration. *Agric. Meteorol.* **8**:385-394

Georges BA., Malano HM., Tri VH., Tural H. 2004. Using modelling to improve operational performance in the Cu Chi irrigation system, Vietnam. *Irrig. and Drain.* **53**: 237-249.

Humbert RP. 1968. *The growing of sugar cane*. New York: Elsevier
 Inman-Bamber NG., Baillie C., Wilcox J. 2002. Tools for improving efficiency of limited water use in sugarcane. In: *Proceedings of Irrigation Ass. Australia, Nat. conf. Sydney 21 23 May* : 251-259.

Jackson RD. 1984. Remote sensing of vegetation characteristics for farm management. *Proc. SPIE Remote Sensing Symp.* 475:81-96.

Loague K., Green RE. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. *J. Contam. Hydrol.* **7**:51-73.

Mailhol JC. 2005. Contribution à la maîtrise de l'irrigation et de ses impacts. Diplôme d'habilitation à diriger des recherches (HDR). Université Montpellier 2, France

Smith M. 1992. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management. *FAO Irrigation and drainage paper n° 46*. FAO Rome (Italy).

Vauclin M., Chopart J.L 1991. Water balance modelling of a cropped soil : deterministic and stochastic approaches. In: *"Soil water balance in the Sudano-Sahelian zone"*. IAHS public. n°199, Wallingford IAHS edit : 471-482